

# COMPORTAMENTO SAZONAL DOS VENTOS E TEMPERATURAS TERMOSFÉRICAS EM BAIXAS LATITUDES EM FUNÇÃO DO CICLO SOLAR DURANTE CONDIÇÕES GEOMAGNETICAMENTE CALMAS

P. R. Fagundes, J. A. Bittencourt & Y. Sahai

O modelo termosférico global, tridimensional e dependente do tempo desenvolvido na University College London (UCL) foi usado para estudar o comportamento sazonal dos ventos neutros e temperaturas em função do ciclo solar, durante um período geomagneticamente calmo. Foi encontrada uma variação sazonal significativa em ambos os ventos meridional e zonal. O padrão sazonal da temperatura termosférica e das velocidades dos ventos neutros não apresentou mudanças em função do ciclo solar, embora a temperatura termosférica seja de 300 K a 400 K mais fria durante o período de atividade solar mínima e a velocidade dos ventos tenha apresentado uma variação diurna com uma amplitude maior durante o período de atividade solar máxima. São apresentadas e discutidas as comparações entre os resultados das simulações e as observações de ventos neutros realizadas em três localidades de baixas latitudes: Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S latitude magnética), Arequipa (16,5° S, 71,5° W, 3,2° S latitude magnética) e Arecibo (18,3° N, 66,8° W, 30° N latitude magnética).

**Palavras-chave:** Modelo atmosférico; Termosfera; Ventos neutros.

**SEASONAL AND SOLAR CYCLE BEHAVIOUR OF THE THERMOSPHERIC WINDS AND TEMPERATURES AT LOW LATITUDES DURING GEOMAGNETICALLY QUIET CONDITIONS** - *A global, three-dimensional, time-dependent numerical model of the thermosphere (University College London Model) has been used to study the seasonal and solar cycle behaviour of the thermosphere wind and temperature at low latitudes during quiet conditions. Significant seasonal variations in both meridional and zonal winds were noticed. The thermospheric temperature and wind velocity seasonal patterns show no changes during the solar cycle. However, the temperature is 300 K to 400 K cooler at low solar activity and the wind velocities show a diurnal amplitude variation larger during high solar activity. A comparison is made between the neutral wind velocities observed and predicted by the UCL model at three low latitude stations: Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S dip latitude), Arequipa (16.5° S, 71.5° W, 3.2° S dip latitude) and Arecibo (18.3° N, 66.8° W, 30° N dip latitude).*

**Key words:** *Atmospheric model; Thermosphere; Neutral winds.*

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, C.P. 515,  
12.201-970 - São José dos Campos, SP, Brasil.

## INTRODUÇÃO

Na termosfera, região da atmosfera terrestre acima de aproximadamente 100 km, o oxigênio atômico torna-se o principal constituinte e a temperatura aumenta em função da altura, devido ao aquecimento pelo UV e EUV, até atingir um valor que varia de 500 K a 2000 K, valor este que depende da atividade solar. O gradiente de temperatura observado na termosfera tem uma forte dependência com a radiação solar (UV e EUV). Sendo assim, variações diárias, sazonal, anual e geográficas do fluxo de energia solar são muito importantes para entender os processos físicos que ocorrem na termosfera.

A 300 km de altitude a frequência média de colisão entre as partículas é da ordem de um segundo, o que significa um caminho livre médio de aproximadamente 1 km. Sendo assim, a termosfera pode ser tratada como um fluido constituído por uma única espécie, sujeita às equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia. As forças que movimentam a massa de ar na termosfera resultam de uma combinação de vários fatores, sendo que a maioria delas são conhecidas, mas algumas não muito bem entendidas.

A absorção do UV, na faixa do espectro entre 1300 Å e 1750 Å (Schumann-Runge), pelo oxigênio molecular é a principal fonte de aquecimento na baixa termosfera. O oxigênio atômico no estado  $^1D$  é produzido pela fotodissociação do oxigênio molecular, sendo que apenas 33% desta energia é liberada para a atmosfera devido às colisões e o restante é liberado na forma de luminescência.

O calor absorvido durante o dia é conduzido para a parte noturna da atmosfera que é mais fria e mais densa e, subsequentemente, perdido pelo resfriamento no infravermelho (luminescência). Roble & Emery (1983) calcularam a temperatura média global usando medidas do fluxo solar (UV e EUV) do satélite AE. Eles concluíram que os dados do satélite concordavam com os modelos empíricos somente para atividade solar mínima, mas, para atividade solar máxima, o modelo apresentava uma atmosfera mais quente. Uma melhor concordância entre as observações e o modelo somente foi conseguida com a inclusão da emissão no infravermelho ( $5,3 \mu m$ ) do NO.

Processos que envolvem transporte, convecção, condução, radiação e o aquecimento pelo UV e EUV são os processos básicos para descrever o balanço de energia da termosfera. Dentre as ferramentas mais importantes no estudo do comportamento dinâmico da termosfera estão os modelos computacionais. Neste sentido foi utilizado um dos modelos termosféricos mais modernos para estudar a termosfera em baixas latitudes. A teoria e a grade numérica do modelo global, tridimensional e dependente do tempo da University College London (UCL) estão descritas em uma série de artigos (Fuller-Rowell & Rees, 1980, 1983; Rees et al., 1980). O modelo resolve simultaneamente as equações de conser-

vação em todos os pontos da grade tridimensional pelo método de diferenças finitas.

O modelo teórico da UCL pode ser usado para prever o comportamento dos ventos neutros e temperaturas termosféricas para qualquer estado estacionário ou durante estados de perturbação devido à entrada de energia e ou quantidade de movimento em função do tempo, incluindo aquecimento pelo EUV, campo elétrico magnetosférico, padrões magnetosféricos de precipitação de elétrons energéticos, consistente com a grade numérica utilizada no modelo de um passo temporal de 1 minuto, 2° latitude, 18° longitude e 15 níveis de pressão (80 km a 500 km).

Em baixas latitudes o modelo ionosférico de Chiu (1975) é usado para calcular o termo de arraste iônico e vários outros termos ionosféricos que contribuem na equação de conservação de energia.

A coordenada vertical  $h$  no modelo é transformada em uma nova variável independente  $p$ . Assim, a equação de conservação de massa no sistema de coordenadas de pressão  $p$  é dada por:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \vec{\nabla}_p \cdot \vec{V} = 0, \quad (1)$$

onde  $\vec{\nabla}_p$  é o operador diferencial bidimensional nas coordenadas de pressão e  $W = \frac{\partial p}{\partial t}$  é a velocidade vertical no sistema de coordenadas  $p$ .

A equação de conservação de quantidade de movimento, que inclui termos não lineares, o gradiente de pressão, os termos de Coriolis, as viscosidades horizontal e vertical e o arraste iônico, é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla}_p \vec{V} + W \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} = -\vec{\nabla}_p \Phi - \\ - \left( 2\Omega + \frac{V_y}{R \sin \theta} \right) \hat{k} \times \vec{V} + g \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\mu P}{H} \frac{\partial}{\partial p} \right) \vec{V} + \\ + \frac{\mu}{\rho} \vec{\nabla}_p^2 \vec{V} + \frac{J \times \vec{B}}{\rho}, \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $\Phi$  é o geopotencial definido por  $d\Phi = g dz$ ,  $\mu_m$  é o coeficiente de viscosidade,  $J$  é a densidade horizontal de corrente elétrica,  $R$  é o raio da terra,  $\vec{B}$  é o campo magnético terrestre e  $V_y$  é a componente zonal do vento neutro.

A equação de conservação de energia inclui termos não lineares, aquecimento solar pelo EUV, resfriamento pelo infravermelho, gradientes horizontal e vertical de condução de calor e o termo de aquecimento Joule, e é

dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla}_p (\varepsilon + gh) + W \frac{\partial (\varepsilon + gh)}{\partial p} = Q_{EUV} + \\ + Q_{IR} + g \frac{\partial}{\partial p} \left[ \frac{(K_M + K_T)P}{H} \right] \frac{\partial T}{\partial p} + \\ + \vec{V} \cdot \left[ g \frac{\partial \mu P}{\partial p H} \right] \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} + \frac{(K_M + K_T)}{\rho} \vec{\nabla}_p^2 T - \\ - g \frac{\partial}{\partial p} \frac{K_T g}{C_p} + \frac{\vec{J} \cdot \vec{E}}{\rho}, \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $\varepsilon = 1/2 V^2 + C_p T$ ,  $Q_{EUV}$  é o aquecimento solar,  $Q_{IR}$  é o resfriamento pelo infravermelho,  $K_M$  e  $K_T$  são os coeficientes molecular e turbulento de condução de calor,  $C_p$  é o calor específico à pressão constante e  $\vec{E}$  é o campo elétrico externo.

O modelo teórico foi desenvolvido na University College London (UCL) para auxiliar na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na dinâmica da termosfera. Até o presente momento este modelo foi utilizado para estudar o comportamento dos ventos neutros e temperaturas em latitudes médias e altas, visto que a maioria dos observatórios que realizam medidas de parâmetros termosféricos (velocidades dos ventos neutros e temperaturas) estão localizados nestas latitudes. O modelo não havia sido, até o momento, utilizado para estudar a dinâmica da termosfera em baixas latitudes. Motivado por esta lacuna realizou-se, então, um estudo da dinâmica da termosfera em baixas latitudes utilizando simulações com o modelo da UCL e observações das velocidades dos ventos e das temperaturas termosféricas realizadas em Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S latitude magnética), Arequipa (16,5° S, 71,5° W, 3,2° S latitude magnética) e Arecibo (18,3° N, 66,8° W, 30° N latitude magnética)

## RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Faz-se uma análise detalhada do comportamento sazonal da temperatura e dos ventos neutros termosféricos em baixas latitudes, para um período magneticamente calmo, e para períodos de atividade solar máxima ( $F_{10.7} = 200$ ) e mínima ( $F_{10.7} = 75$ ), utilizando os resultados de oito diferentes simulações do modelo termosférico global dependente do tempo. As equações de conservação no modelo são integradas numericamente a cada minuto, mas os resultados são registrados a cada 72 minutos. Desta forma, um dia

completo de simulação fornece os resultados do modelo para 20 diferentes instantes em toda a malha (a qual consiste de 15 níveis de pressão, 20 pontos em longitude e 90 pontos em latitude).

Nas Figs. 1 a 4 são apresentados os resultados das simulações para o equinócio (21 de setembro) e inverno (21 de junho), para os períodos de atividade solar máxima (Figs. 1 e 3) e atividade solar mínima (Figs. 2 e 4). Nestas Figs. (1 a 4) as temperaturas são apresentadas na forma de isolinhas e as velocidades dos ventos neutros na forma de vetores. Estes resultados dão uma idéia instantânea (como uma foto) da estrutura de temperatura e o sentido dos ventos, em função da latitude e longitude (hora local) às 02:24 UT (tempo universal), correspondente aproximadamente à meia-noite (hora local) sobre Cachoeira Paulista.

Nos equinócios (Figs. 1 e 2) o ponto sub-solar está localizado no equador e, conseqüentemente, espera-se que o gradiente de pressão em ambos os hemisférios seja bem semelhante. No entanto a distribuição espacial dos ventos neutros e temperaturas não são simétricas em relação ao equador geográfico, devido à ação direta do arraste iônico. Esta assimetria é causada pela distribuição espacial assimétrica da ionização ionosférica, em conseqüência dos efeitos eletrodinâmicos associados à não-coincidência entre os equadores geográfico e magnético, e também à variação longitudinal da declinação na região de baixas latitudes.

O gradiente horizontal de pressão, que é diretamente dependente dos gradientes horizontais de temperatura e de densidade da termosfera (gerados entre as partes iluminada e não-iluminada da termosfera), é a força motriz que governa a dinâmica da termosfera (direção dos ventos meridional e zonal). Ou seja, o comportamento geral dos ventos neutros termosféricos é determinado principalmente pela distribuição espacial e temporal do gradiente de pressão. A posição do ponto sub-solar influencia fortemente o comportamento sazonal dos ventos meridional e zonal. As magnitudes resultantes dos ventos meridional e zonal são determinadas por uma relação mais complexa que envolve, além da distribuição espacial do gradiente horizontal de pressão e a posição do ponto sub-solar, as forças associadas à viscosidade e ao arraste iônico. Como discutido em Anderson et al. (1989), o modelo ionosférico de Chiu (1975) apresenta uma deficiência na representação de  $h_m F_2$  em baixas latitudes, incluindo a região da anomalia equatorial. Esta deficiência na representação dos parâmetros ionosféricos  $h_m F_2$  e  $f_0 F_2$ , em baixas latitudes pode ter conseqüências significativas no cálculo dos ventos neutros, principalmente após o pôr do sol, quando as principais forças que dirigem a dinâmica da termosfera são o gradiente horizontal de pressão e o arraste iônico. Os baixos valores para  $h_m F_2$  previstos pelo modelo de Chiu resultam, conseqüentemente, em um plasma mais denso que o esperado na faixa de altitude de 300 km, resultando assim, em uma

subestimação no cálculo do vento zonal (Anderson & Roble, 1974). É bem conhecido da literatura que a termosfera geralmente é de 300 K a 400 K mais quente durante o período de atividade solar máxima, em relação ao período de atividade solar mínima. As simulações reproduziram esta dependência da temperatura em função da atividade solar de maneira satisfatória.

Em contraste com as modificações que ocorrem na

temperatura (veja Figs.1 a 4), na densidade e na pressão (Hedin et al., 1991) em função do ciclo solar, o campo de velocidade de ventos neutros sofre apenas mudanças consideradas modestas em função do ciclo solar. Este comportamento reflete o fato de que os gradientes de temperatura e de densidade entre as partes iluminada e não-iluminada da termosfera são pouco afetados em função do ciclo solar.

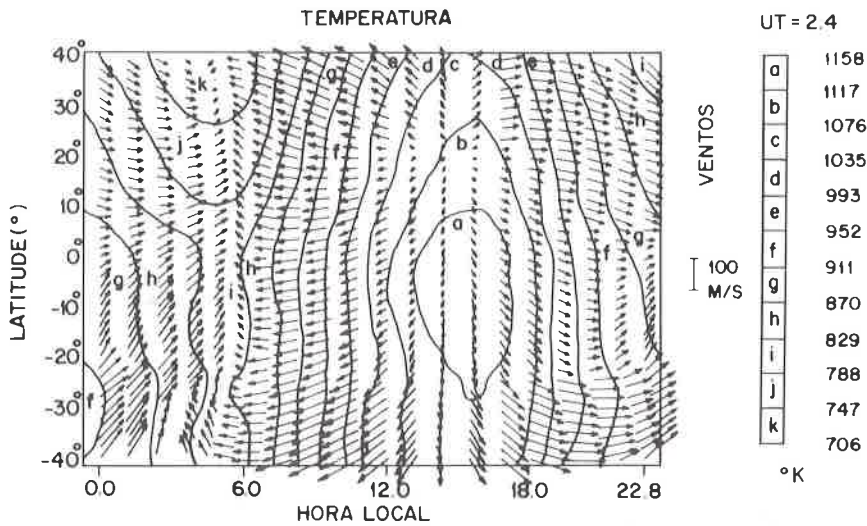


Figure 1 - Neutral wind and temperature predicted by the UCL model for 21 September for quiet geomagnetic conditions and maximum solar activity.

Figura 1 - Resultados dos ventos e temperaturas simulados para o dia 21 de setembro usando o modelo da UCL para um período geomagneticamente calmo e atividade solar máxima.

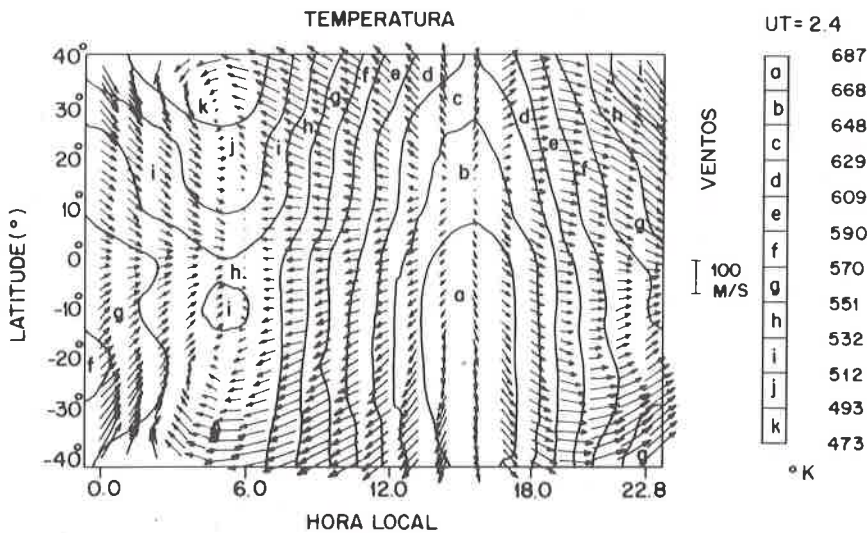
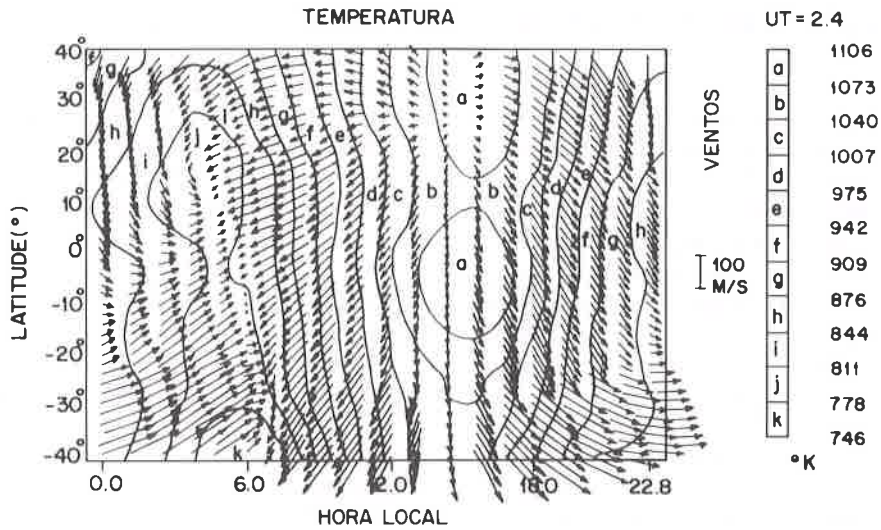


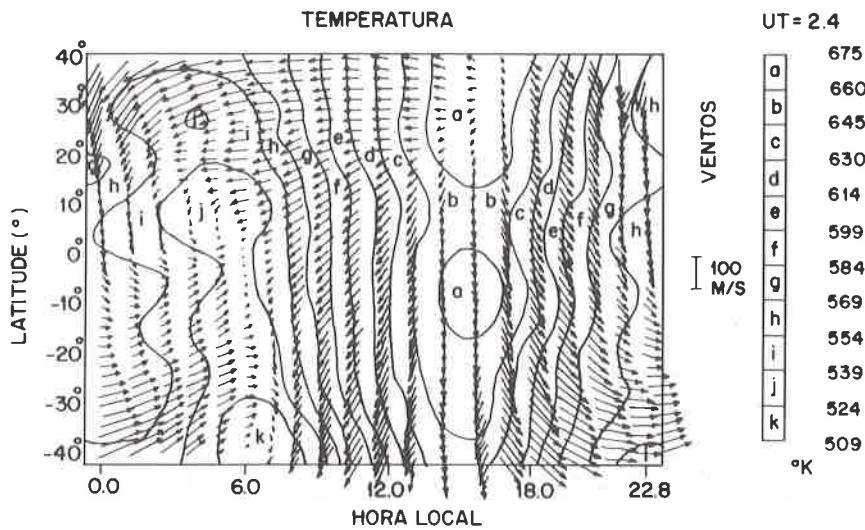
Figure 2 - Neutral wind and temperature predicted by the UCL model for 21 September for quiet geomagnetic conditions and minimum solar activity.

Figura 2 - Resultados dos ventos e temperaturas simulados para o dia 21 de setembro usando o modelo da UCL para um período geomagneticamente calmo e atividade solar mínima.



**Figure 3** - Neutral wind and temperature predicted by the UCL model for 21 June for quiet geomagnetic conditions for maximum solar activity.

**Figura 3** - Resultados dos ventos e temperaturas simulados para o dia 21 de Junho usando o modelo da UCL para um período geomagneticamente calmo e atividade solar máxima.



**Figure 4** - Neutral wind temperature predicted by the UCL model for 21 June for quiet geomagnetic conditions and minimum solar activity.

**Figura 4** - Resultados dos ventos e temperaturas simulados para o dia 21 de junho usando o modelo da UCL para um período geomagneticamente calmo e atividade solar mínima.

### COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES E OBSERVAÇÕES REALIZADAS EM BAIXAS LATITUDES

As observações dos ventos neutros e temperaturas nas três localidades foram realizadas durante a noite por um interferômetro tipo Fabry-Perot. Este interferômetro mede o alargamento e o deslocamento Doppler da linha vermelha do oxigênio atômico (OI 630,0 nm de manô-

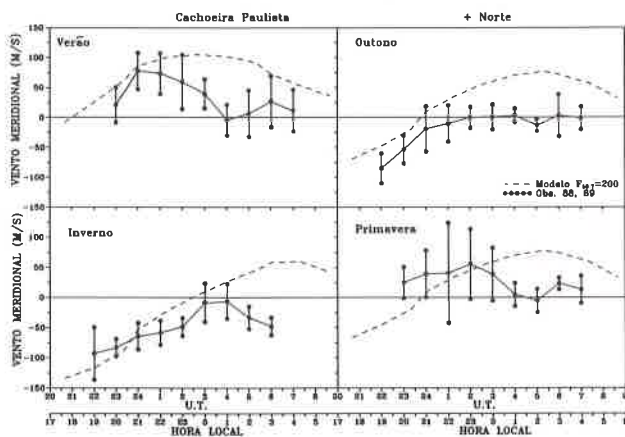
metro) possibilitando assim inferir a temperatura e a velocidade, respectivamente.

As comparações entre os resultados das simulações e as observações realizadas em três localidades de baixas latitudes, Cachocira Paulista (23° S, 45° W, 15° S latitude magnética), Arequipa (16,5° S, 71,5° W, 3,2° S latitude magnética) e Arecibo (18,3° N, 66,8° W, 30° N latitude magnética) estão apresentadas a seguir.

### Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S latitude magnética)

O comportamento sazonal dos ventos neutros e temperaturas termosféricas em Cachoeira Paulista para o período entre 1988 a 1989 ( $F_{10,7}=114-210$ ) foi estudado por Sahai et al. (1992a e 1992b). O vento meridional observado no inverno ( $F_{10,7}=210$ ) e outono ( $F_{10,7}=114$ ) (Fig. 5) apresentou características bastante semelhantes, ou seja, no início da noite está direcionado para o pólo e com o passar da noite vai diminuindo a sua magnitude até atingir valores próximos de zero ou mesmo invertendo a sua direção para o equador. No verão ( $F_{10,7}=195$ ) e a primavera ( $F_{10,7}=207$ ) o vento meridional observado está direcionado para o equador durante a primeira parte da noite (19:00 UT a 0:00 UT) e na segunda parte da noite (0:00 UT a 4:00 UT) o vento não apresenta uma característica bem definida, ou seja, algumas noites está dirigida para o norte e outras para sul (Veja Fig. 5).

Os resultados da simulação para o vento meridional no inverno apresentam uma concordância razoável com as observações, mas no final da noite os resultados da simulação apresentam valores ligeiramente superiores

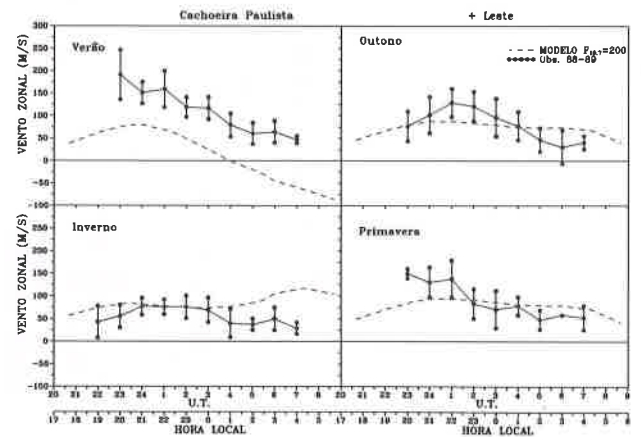


**Figure 5** - Average local time variation of the measurements of meridional wind velocities at Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S dip latitude) for different seasons (Sahai et al., 1992a). The vertical bars show the standard deviations. Dashed line is predicted UCL model results.

**Figura 5** - Média horária da velocidade meridional observada em Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S latitude magnética) para diferentes estações do ano (Sahai et al., 1992a). As barras verticais indicam o desvio padrão. A linha tracejada apresenta a previsão do modelo da UCL.

aos observados. No outono existe uma boa concordância entre os resultados da simulação e as observações no início da noite (19:00 UT a 22:00 UT) e depois das 22:00 UT quando o vento meridional apresenta uma magnitude próxima de zero os resultados do modelo apresentam um vento dirigido para o norte. No verão e na primavera os resultados da simulação apresentam uma concordância razoável com as observações no início da noite (22:00 UT a 2:00 UT), mas no restante da noite os resultados do modelo apresentam uma magnitude maior que as observadas.

O vento zonal observado está durante toda a noite direcionado para leste em todas as estações do ano e os resultados das simulações mostram uma concordância razoável com as observações realizadas em Cachoeira Paulista (Fig. 6), durante o outono ( $F_{10,7}=114$ ), inverno ( $F_{10,7}=210$ ) e primavera ( $F_{10,7}=207$ ), sendo que, no inverno, o modelo apresenta valores ligeiramente superiores no final da noite (entre 05:00 UT e 06:00 UT). No verão ( $F_{10,7}=195$ ), os resultados da simulação diferem na magnitude do vento zonal observado, sendo que o modelo apresenta valores substancialmente inferiores aos observados, e uma inversão para oeste após as 4:00 UT, inversão esta que não foi observada.



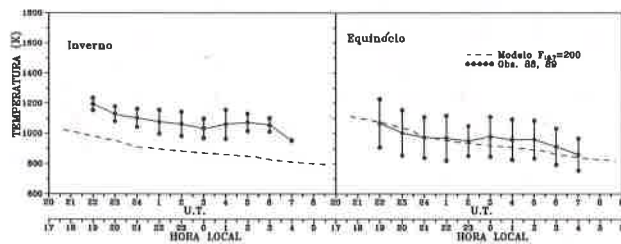
**Figure 6** - Average local time variation of the measurements of zonal wind velocities at Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S dip latitude) for different seasons (Sahai et al., 1992a). The vertical bars show the standard deviations. Dashed line is predicted UCL model results.

**Figura 6** - Média horária da velocidade zonal observada em Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S latitude magnética) para diferentes estações do ano (Sahai et al., 1992a). As barras verticais indicam o desvio padrão. A linha tracejada apresenta a previsão do modelo da UCL.

As temperaturas termosféricas observadas sobre Cachoeira Paulista (Fig. 7) no inverno ( $F_{10.7}=210$ ) no início da noite, estão por volta de 1200 K e decrescem lentamente até atingir 1000 K no final da noite. A tendência dos resultados das simulações concordam com aquela da temperatura termosférica observada, mas os valores da temperatura termosférica observada são consistentemente maiores, durante toda noite, do que os da simulação. Os resultados da simulação concordam muito bem com as temperaturas observadas no equinócio, no período entre 1988-1989 ( $F_{10.7}=167$ ), sendo que os dados referentes ao equinócio entre 1988-1989 foram obtidos a partir das observações realizadas na primavera e outono.

### Arequipa (16,5° S, 71,5° W, 3,2° S latitude magnética), Peru

Os ventos neutros observados em Arequipa, que são utilizados neste trabalho (Figs. 8 e 9), foram extraídos dos gráficos apresentados por Biondi et al. (1991). Como as observações realizadas em Arequipa apresentam um bom conjunto de dados, tanto durante o período de atividade máxima como de mínima, a comparação destas observações com os resultados das simulações é muito importante para o presente estudo.



**Figure 7** - Average local time variation of the measurements of the termospheric temperature at Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S dip latitude) for different seasons (Sahai et al., 1992 b). The vertical bars show the standard deviations. Dashed line is predicted UCL model results.

**Figura 7** - Média horária da temperatura observada em Cachoeira Paulista (23° S, 45° W, 15° S latitude magnética) para diferentes estações do ano (Sahai et al., 1992b). As barras verticais indicam o desvio padrão. A linha tracejada apresenta a previsão do modelo da UCL.

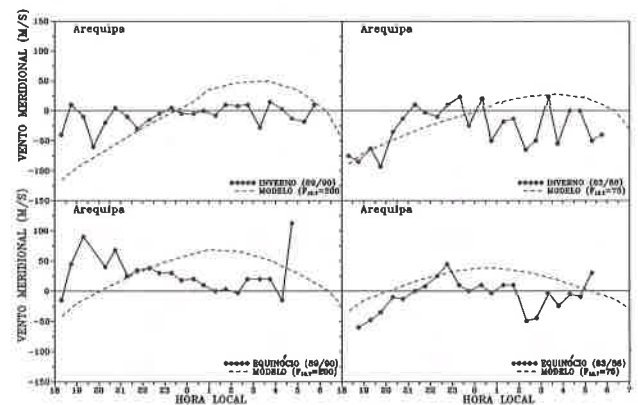
Nas Figs. 8 e 9 são apresentados os resultados das simulações e das observações sobre Arequipa. Nota-se que os resultados do modelo apresentam uma melhor concordância com as observações dos ventos meridional e zonal durante o período de atividade solar mínima, tanto para o inverno como para o equinócio.

No entanto, para o período de atividade solar máxima, os resultados do modelo não concordam com o comportamento geral e com a magnitude do vento meridional observado. Já o vento zonal observado permanece consistentemente mais forte, durante toda a noite, do que os resultados da simulação.

### Arequito (18,6° W, 66,8°, 30° N latitude magnética), Porto Rico

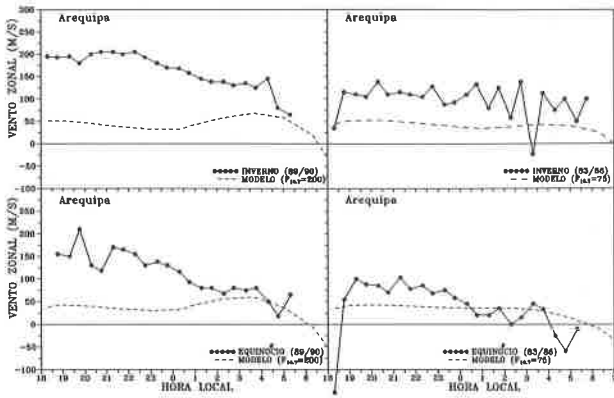
Os ventos neutros observados em Arequito (18,6° N, 66,8° W, 30° N latitude magnética) durante o período de atividade solar máxima (1980), que são utilizados neste trabalho, foram extraídos de Burnside et al. (1981, 1989).

As simulações apresentam uma concordância razoável, tanto para o vento meridional como para o vento zonal, durante o inverno (Fig. 10). No entanto, para os meses de fevereiro e abril, o modelo apresenta concordância somente após a meia-noite (hora local).



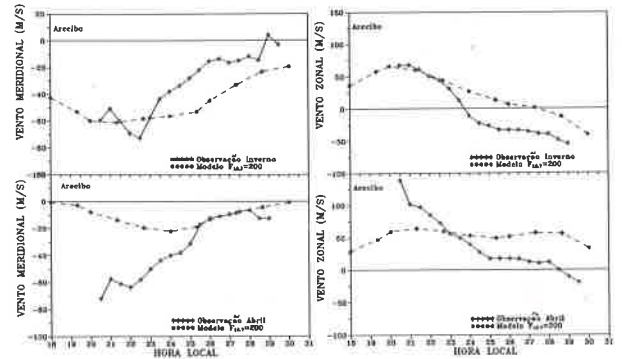
**Figure 8** - Average local time variation of the measurements of the meridional wind velocities over Arequito (16.5° S, 71.5° W, 3.2° S dip latitude) for winter and equinoxes during maximum and minimum solar activity (Biondi et al., 1991). Dashed line is predicted UCL model results.

**Figure 8** - Comportamento do vento meridional observado em Arequito (16,5° S, 71,5° W, 3,2° S latitude magnética), no inverno e equinócio, para os períodos de atividade solar máxima e mínima (Biondi et al., 1991). A linha tracejada apresenta a previsão do modelo da UCL.



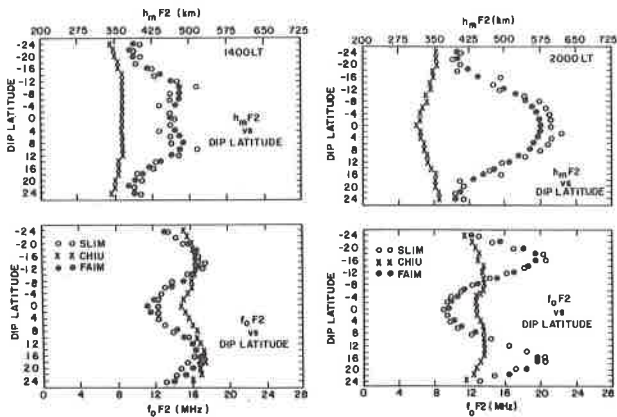
**Figure 9** - Average local time variation of the measurements of the zonal wind velocities over Arequipa (16.5° S, 71.5° W, 3.2° S dip latitude) for winter and equinoxes during maximum and minimum solar activity (Biondi et al., 1991). Dashed line is predicted UCL model results.

**Figura 9** - Comportamento do vento zonal observado em Arequipa (16,5° S, 71,5° W, 3,2° S latitude magnética) no inverno e equinócio, para os períodos de atividade solar máxima e mínima (Biondi et al., 1991). A linha tracejada apresenta a previsão do modelo termosférico global.



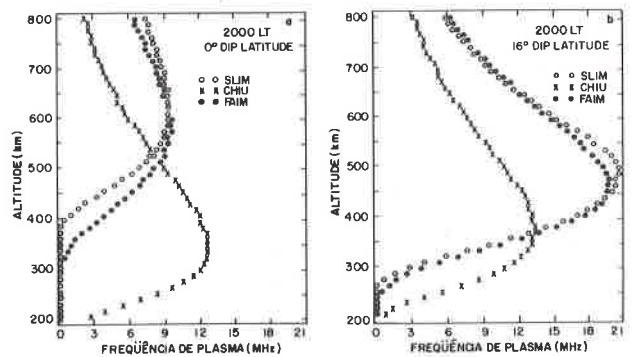
**Figure 10** - Average local time variation of the measurements of the zonal and meridional wind velocities over Arecibo (18.3° N, 66.8° W, 30° N dip latitude) during maximum solar activity (Burnside et al., 1981). Dashed line is predicted UCL model results.

**Figura 10** - Comportamento do vento meridional e zonal observado em Arecibo (18,6° N, 66,8° W, 30° N latitude magnética) no inverno em fevereiro/abril, para o período de atividade solar máxima (Burnside et al., 1981). As linhas tracejadas apresentam a previsão do modelo termosférico global.



**Figure 11**- Comparison of (top)  $h_m F_2$  and bottom  $f_o F_2$  values as function of dip latitude at 1400 LT and 20:00 LT given by SLIM, Chiu (1975), and FAIM ionospheric models for solar cycle maximum, equinoctial conditions (Anderson et al., 1989).

**Figura 11** - Variação da  $h_m F_2$  e  $f_o F_2$  em função da latitude magnética para os modelos ionosféricos de Chiu (1975), SLIM e FAIM, para as 14:00 LT e 20:00 LT durante o equinócio e atividade solar máxima (Anderson et al., 1989).



**Figure 12** - Comparison between SLIM, Chiu (1975), and FAIM electron density profiles (plasma frequency in megahertz) at 20:00 LT at magnetic equator and 16°S dip latitude (Anderson et al., 1989).

**Figura 12** - Variação da freqüência de plasma (densidade eletrônica) em função da altura as 20:00 LT a 0° e 16° S latitude magnéticas, para os modelos ionosféricos de Chiu (1975), SLIM e FAIM (Anderson et al., 1989).



## CONCLUSÕES

A boa concordância no comportamento noturno (variação temporal) e na magnitude, entre os resultados das simulações e as temperaturas observadas em Cachoeira Paulista (Fig. 7), indica que os parâmetros envolvidos no aquecimento da termosfera (fluxo solar, seções transversais de absorção e densidade dos constituintes) estão muito próximos da realidade.

A diferença de magnitude do vento zonal em Arequipa (16,5° S, 71,5° W, 3,2° S latitude magnética) com as outras duas estações estudadas (Cachoeira Paulista 23° S, 45° W, 15° S latitude magnética) e Arecibo (18,6° N, 66,8° W, 30° N latitude magnética) pode ser atribuída às diferenças existentes entre as ionosferas (densidade eletrônica e altura da camada) destas três estações, diferenças estas que, por sua vez, podem ser atribuídas principalmente à grande diferença na latitude geomagnética destas três estações. Isto implica diferentes magnitudes do termo de arraste iônico na atmosfera neutra. Como discutido por Anderson & Roble (1974), as colisões entre O<sup>+</sup> e átomos e moléculas da termosfera diminuem a velocidade do vento zonal proporcionalmente à concentração de íons na altitude de emissão máxima de 630,0 nm, entre 250 km e 300 km (emissão usada para inferir a velocidade dos ventos neutros).

Anderson et al. (1987, 1989) mostraram que em torno das 20:00 LT, durante o equinócio e atividade solar máxima, em Arecibo (30° N) e Arequipa (3,2° S), o pico da camada está localizado a 400 km e 570 km, respectivamente, e  $f_0F_2=10$  MHz para as duas estações. Portanto, o pico da camada em Arecibo está mais baixo do que em Arequipa e com uma densidade iônica semelhante. Como os gradientes horizontais de pressão para os dois observatórios são semelhantes no equinócio, o termo de arraste iônico deve ser maior em Arecibo do que em Arequipa, resultando numa velocidade para o vento zonal menor em Arecibo.

Como discutido em Anderson et al. (1989), o modelo de Chiu (1975) fornece uma altura não realista para o pico da camada F em baixas latitudes, e isto pode ter conseqüências muito significativas no cálculo dos ventos neutros. A deriva  $\vec{E} \times \vec{B}$  no equador é responsável por manter a anomalia de Appleton e esta anomalia na variação latitudinal de  $f_0F_2$  não está muito bem representada no modelo de Chiu (1975). Na Fig. 11 apresenta-se a variação latitudinal prevista pelo modelo de Chiu (1975), de  $h_mF_2$  e  $f_0F_2$  para dois horários (14:00 LT e 20:00 LT) e, na Fig. 12 apresenta-se o perfil vertical da frequência de plasma em função da altura às 20:00 LT para duas latitudes magnéticas (0° e 16°).

As discrepâncias surgidas entre as observações e os resultados do modelo, em Arequipa, principalmente durante o período de atividade solar máxima (Figs. 8 e 9), em Cachoeira Paulista, no vento meridional, durante

outono e primavera, e no vento zonal, durante o verão (Figs. 5 e 7), e em Arecibo no vento meridional durante fevereiro/abril (Fig. 10), provavelmente devem estar associadas ao acoplamento ionosfera/termosfera via arraste iônico. O modelo empírico ionosférico que é usado (Chiu, 1975), provavelmente torna-se muito crítico no cálculo dos ventos neutros durante o período de atividade solar máxima.

É importante notar que, para o período de atividade solar mínima, em Arequipa, os resultados das simulações concordaram com as observações dos ventos meridional e zonal. Pode-se, então, dizer que, durante o período de atividade solar mínima, o termo de arraste iônico não é tão importante na dinâmica da termosfera em Arequipa.

A comparação das observações e os resultados das simulações realizadas neste trabalho mostram que é possível simular a dinâmica da termosfera utilizando o conhecimento atual dos parâmetros envolvidos nas equações de conservação (aquecimento solar, resfriamento por infravermelho, coeficientes de viscosidade e condução térmica etc.), mas é necessário avançar no conhecimento do acoplamento termosfera/ionosfera em baixas latitudes para que as simulações da dinâmica da termosfera, e também da ionosfera, sejam auto-consistentes e mais realistas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. D. Rees pelo apoio e incentivo dado durante a permanência de P.R. Fagundes no Atmospheric Physics Laboratory (University College London), ao CNPq (processo 300955/93-6) e à FAPESP (processo 92/5014-1) pela viabilização deste trabalho através dos seus programas de bolsa de estudo.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D. M. - 1976 - Modeling the midlatitude F region ionospheric storm using east-west drift and a meridional wind. *Planet. Space Sci.*, **24**: 69-77.
- ANDERSON, D. N. & ROBLE, R. G. - 1974- The effect of the vertical  $\vec{E} \times \vec{B}$  ionospheric drifts on F-regions neutral winds in the low latitude thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **79**: 5231-5236.
- ANDERSON, D. N., FORBES, J. M. & CODRESCU, M. - 1989- A fully analytic, low and middle latitude ionospheric model. *J. Geophys. Res.*, **94**: 1520-1524.
- ANDERSON, D. N., MENDILO, M. & HERNITER, B.- 1987 - A semi-empirical low-latitude ionospheric model. *Radio Sci.*, **22**: 192-306.
- BIONDI, M. A., MERIWETHER, J. W., FEGER, B. G., GONZALEZ, S. A. & HALLENBECK, D. C. - 1991 - Equatorial thermospheric winds changes during the solar cycle: Measurements at Arequipa,

- Peru, from 1983 to 1990. *J. Geophys. Res.*, **96**: 15917-15930.
- BURNSIDE, R. G., HERRERO, F. A., MERIWETHER, J. W. & WALKER, J. C. G.** - 1981 - Optical observations of thermospheric dynamics at Arecibo. *J. Geophys. Res.*, **86**: 5532-5540.
- BURNSIDE, R. G. & TEPLEY, C. A.** - 1989 - Optical observations of thermospheric neutral winds at Arecibo between 1980 and 1987. *J. Geophys. Res.*, **94**: 2711-2716.
- CHIU, Y. T.** - 1975 - An improved phenomenological model of ionospheric density. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**: 1563-1570.
- FULLER-ROWELL, T. J. & REES, D.** - 1980 - A three-dimensional, time-dependent global model of the thermosphere. *J. Atmos. Sci.*, **37**: 2545-2567.
- FULLER-ROWELL, T. J. & REES, D.** - 1983 - Derivation of conservation equation for mean molecular weight for two-constituent gas within a three-dimensional, time-dependent model of the thermosphere. *Planet. Space Sci.*, **31**: 1209-1222.
- HEDIN, A. E., BIONDI, M. A., BURNSIDE, R. G., HERNANDEZ, G., JOHNSON, R. M., KILEEN, T. L., MAZAUDIER, C., SALAH, J. E., SICA, R. J., SMITH, R. W., SPENCER, N. W., WHICKWAR, V. B. & VIRDI, T. S.** - 1991 - Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, **96**: 7657-7688.
- REES, D., FULLER-ROWELL, T. J. & SMITH, R. W.** - 1980 - Measurement of high latitude thermospheric winds by rocket and ground-based techniques and their interpretation using a three-dimensional, time-dependent dynamics model. *Planet. Space Sci.*, **28**: 919-932.
- ROBLE, R. G. & EMERY, B. A.** - 1983 - On the global mean temperature of the thermosphere. *Planet. Space Sci.*, **31**: 597-614.
- SAHAI, Y., TAKAHASHI, H., FAGUNDES, P. R., CLEMESHA, B. R., TEIXEIRA, N. R. & BITTENCOURT, J. A.** - 1992a - Observations of thermospheric neutral winds at 23° S. *Planet. Space Sci.*, **40**: 767-773.
- SAHAI, Y., TAKAHASHI, H., TEIXEIRA, N. R., FAGUNDES, P. R., CLEMESHA, B. R. & BITTENCOURT, J. A.** 1992b - Observations of thermospheric temperatures at 23° S. *Planet. Space Sci.*, **40**: 1545-1549

Submetido em: 19/04/94

Revisado pelo(s) autor(es) em: 09/09/94

Accito em: 22/09/94